

탄소나노튜브(CNT) 복합소재

윤창훈 · 이현상

1. 탄소나노튜브

나노기술(nanotechnology, NT)은 향후 21세기를 선도해 나갈 수 있는 과학기술로 전자정보통신, 환경 및 에너지, 바이오 등의 분야에서 필수적인 기술로 가까운 미래에 정보전자 소재, 의약 및 에너지 등의 분야에서 기술적 진보의 방향을 획기적으로 바꿀 수 있는 돌파구가 될 것으로 기대되고 있다. 특히 나노복합재료는 단일 소재로는 달성될 수 없는 뛰어난 치수안정성, 기계적 강도, 전기적 특성 등을 지니고 있어 첨단소재로서 그 중요성이 대두되고 있다. 나노복합재료는 분자레벨이나 나노미터 스케일의 이중 물질을 분산시켜 복합화한 것으로 보통 분산상의 크기가 1~100 nm 정도로 이며 기존의 고분자가 가지는 뛰어난 가공성, 기계적, 광학적 성질 등을 더욱 향상시킬 수 있어 자동차부품, 전기/전자, 빌딩/건축 등과 같이 넓은 범위에서 응용될 가능성이 높은 차세대 복합소재로 큰 관심을 끌고 있다.

나노복합소재에 많이 사용되고 있는 나노 충전제로 실리케이트 층상 구조를 가지고 있는 clay 광물이 대표적이거나 최근 들어 전기적, 기계적 특성이 우수한 탄소나노튜브의 등장으로 이를 이용하여 고성능의 첨단 신소재를 제조하고자 하는 연구가 활발히 진행 중이다.

탄소나노튜브는 흑연면(graphite sheet)이 나노 크기의 직경으로 동글게 말려 관 모양을 이루고 있으며 관의 지름이 수~수십 나노미터에 불과하여 탄소나노튜브라고 일컬어지게 되었다. 이 흑연면이 말리는 각도와 구조에 따라서 금속 또는 반도체의 특성을 보인다. 나노튜브의 벽수에 따라서 단중벽 탄소나노튜브(single-walled carbon nanotube), 이중벽 탄소나노튜브(double-walled carbon nanotube), 다중벽 탄소나노튜브(multi-walled carbon nanotube), 다발형 탄소나노튜브(rope carbon nanotube)로 구분할 수 있다(그림 1). 탄소나노튜브는 전기 전도도가 구리와 비슷하고, 열전도율은 자연계에서 가장 뛰어난 다이아몬드와 같으며, 강도는 철강보다 100배나 뛰어나다. 탄소섬유는 1%만 변형시켜도 끊어지는 반면 탄소나노튜브는 15%가 변형되어도 견딜 수 있다. 탄소나노튜브의 우수한 특성들을 이용한 반도체와 평판 디스플레이, 배터리, 초강력 섬유, 생체 센서 등과 같은 장치가 수없이 개발되고 있으며, 나노 크기의 물질을 집어 옮길 수 있는 나노집게로도 활용되고 있다(표 1).

2. 탄소나노튜브 복합소재

최근 들어 탄소나노튜브의 완벽한 구조로부터 이들이 가지는 우수한 기계적 성질을 이용한 초고강도 구조용 복합재료의 강화제로의 활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 탄소나노튜브가 복합소재에서 물성을 충분히 발휘하기 위해서 우선 확보되어야 하는 기술은 탄소나노튜브 복합소재 개발에서 중요한 기술로 인식되고 있는 고분자 매트릭스에서 탄소나노튜브의 분산 기술이다. 탄소나노튜브는 미세분말 상태로 그 자체로는 여러 응용분야에 사용되기는 어렵고 탄소나노튜브의 우수한 우수한 특성들을 효과적으로 발현시키기 위해서는 반드시 기지재료나 다른 소재와 복합화되어 사용되어야 하기 때문에 탄소나노튜브의 분산기술이 중요하다. 탄소나노튜브를 고분자와 복합화 하기 위한 방법으로는 현재까지 보고 되고 있는 가공방법으로 동시중합(*in-situ* polymerization), 용액 복합화(solution mixing)과 용융 복합화(melt mixing)가 소개되고 있다.

2.1 탄소나노튜브의 분산

탄소나노튜브의 우수한 기계적 특성을 고분자 복합소재에서 구현



윤창훈

1996 성균관대학교 섬유공학과(학사)
 1999 성균관대학교 섬유공학과(석사)
 1999~2000 서울대학교 신소재공동연구원 연구원
 2005 성균관대학교 유기소재공학과(박사)
 2005~현재 (주) LG화학/테크센터 선임연구원



이현상

1992 고려대학교 화학공학과(학사)
 1994 고려대학교 화학공학과(석사)
 1997 고려대학교 화학공학과(박사)
 1997~2000 미국 캘리포니아 버클리대학교 연구원
 2000~현재 (주) LG화학/테크센터 책임연구원

Carbon Nanotube Composite

(주) LG화학/테크센터(Chang Hun Yun and Heon Sang Lee LG Chem, Ltd. /Tech Center, Jang-dong 84, Yusunggu, Daejeon 305-343, Korea) e-mail: heonlee@lgchem.com

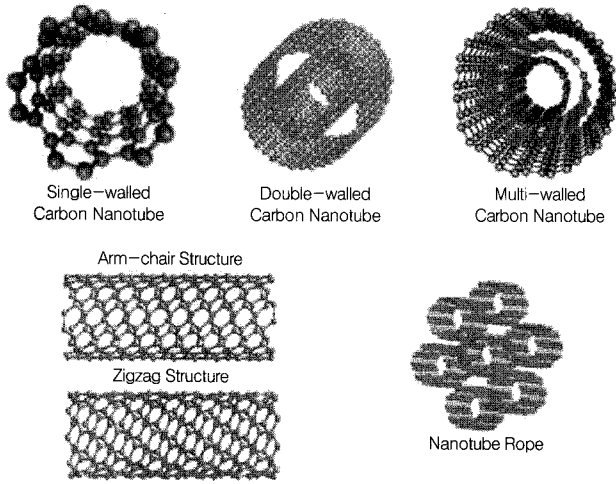


그림 1. 탄소나노튜브의 형태.

표 1. 탄소나노튜브의 용도

분야	용도	비고
전지/콘덴서	연료전지용 수소저장소재 리튬이온전지의 전극소재 전기이중층 콘덴서재료 고성능 축전지	고성능축전지의 장수명화
측정기	나노온도계	
표시소자	FED(Field Emission Display) 형광표시관의 전자총 전계방출형 전자총	10% 낮은 전압에서 가동
탐침/나노테크부재	AFM, ATM 현미경 탐침 나노휘스커, 나노로드	재료의 요철부분의 원자단위로 관찰
회로소재	반도체회로 등의 초미세가공소재	
바이오/의약	바이오센서, 주사침, 캡슐	
복합소재	수지, 세라믹 등의 강화 전기전도성 및 열전도성 소재, 전자파차폐소재,	복합재료의 정전방지, 경량화, 고강도화

하기 위해서는 많은 기술적 난관을 극복해야 한다. 그 중에서도 얽혀있는 상태로 존재하는 탄소나노튜브 rope 내지는 bundle 을 고분자와 복합화에 적당한 크기로 잘라내고 가능한 한 개별 탄소나노튜브 수준으로 분리하여 고분자 매트릭스 내에 안정된 나노분산 상태를 구현해주는 기술 개발이 필수적이다. 탄소나노튜브와 결합하게 되는 고분자 매트릭스 내에서 상분리, 응집, 낮은 분산성 및 접착성을 극복하는 것이 나노복합소재에서 가장 중요한 요건이다. 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 탄소나노튜브 표면을 물리적 화학적으로 처리하는 방법들이 동원되고 있다.

2.1.1 탄소나노튜브의 물리적 개질을 통한 분산성 향상

탄소나노튜브를 가공이 용이한 수준으로 용해시킬 수 있는 용제는 아직까지 보고된 바가 없기 때문에 탄소나노튜브를 용액 내에서 응집되거나 침전되지 않고 안정된 상태로 분산시키기 위해서는 탄소나노튜브와 복합소재의 매트릭스와의 동시에 친화력을 부여할 수 있는 물질을 사용할 필요가 있다. 탄소나노튜브와 복합소재의 매트릭스에 동시에 친화력을 부여해 줄 수 있는 방법으로 계면활성제 첨가, 고분자 wrapping 등이 소개되고 있다. 이러한 물리적 개질 방법은 탄소나노튜브를 손상시키지 않아 고유의 물성을 저하시키지

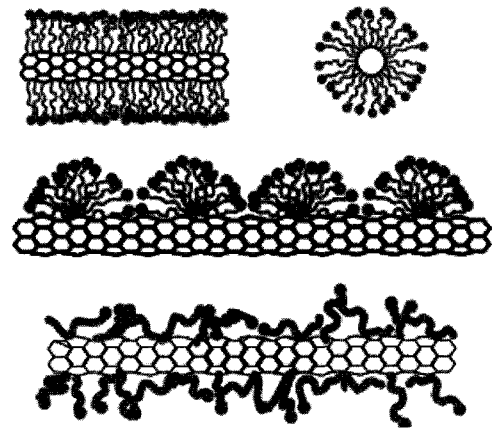


그림 2. 계면활성제에 의해 분산된 탄소나노튜브의 구조.

않는 장점이 있는 반면에 계면접착력이 충분하지 않아 응력 전달이 제대로 이루어지지 않는 단점이 있다. 그림 2는 계면활성제를 첨가하여 탄소나노튜브를 분산시키는 일반적인 방법으로 계면활성제인 sodium dodecylsulphate(SDS) 수용액에 탄소나노튜브를 넣고 초음파를 가해 분산시켰을 때의 탄소나노튜브와 계면활성제의 구조는 나타난 것이다.

2.1.2 탄소나노튜브의 화학적 개질을 통한 분산성 향상

탄소나노튜브를 화학적인 방법을 통하여 표면에 기능성기를 도입시키는 것으로 고분자 매트릭스와 탄소나노튜브와의 결합력은 증대되어 외부의 응력을 효과적으로 탄소나노튜브에 전달하는 장점이 있거나 탄소나노튜브를 손상시켜 탄소나노튜브가 가지는 우수한 기계적 전기적 특성을 저하시킬 수 있어 복합소재의 보강효과를 오히려 저하시킬 수 있는 단점이 있다.

탄소나노튜브의 표면 개질법으로 널리 사용되고 있는 것으로는 다공성탄소 혹은 탄소섬유의 표면 개질 방법에 널리 이용되고 있는 황산 혹은 질산 등으로 표면에 표면기능기를 도입시키는 산처리법이 있다. 탄소나노튜브를 산성 용액에 넣고 높은 온도와 압력을 가해주는 수열적 처리법(hydro-thermal treatment)을 통하여 탄소나노튜브 다발의 풀림현상과 무정질 탄소가 제거되는 것이 보고 되었다.

2.2 탄소나노튜브와 고분자와의 복합화

앞에서 전술한 바와 같이 탄소나노튜브는 미세분말 상태로 그 자체로는 여러 응용분야에 사용되기는 어려워 우수한 특성들을 효과적으로 발현시키기 위해서는 반드시 지지재료나 다른 소재와 복합화되어 사용되어야 한다.

탄소나노튜브는 대부분의 용매에서 그 자체로는 분산이 용이하지 않으나 초음파처리에 의해 탄소나노튜브 분산용액을 얻을 수 있다. Kumar 등은 탄소나노튜브가 분산된 용매에 고분자를 용해시킨 후 이로부터 얻은 섬유와 필름의 기계적 물성이 향상되는 결과를 얻었음을 보고하였다. 그러나 용액복합화는 아직 고분자 용액 내에서 탄소나노튜브의 분산 안정성이 확보되지 않아 용매 추출 시 상분리가 발생하여 탄소나노튜브가 균일하게 분산된 복합소재를 얻기가 어렵다. 또한 탄소나노튜브의 분산 시 사용되는 계면활성제가 복합소재 제조 후 복합체의 물성에 영향을 미칠 수 있는 문제점이 있다. 용융 복합화는 용액 복합화에 비해 경제적인 측면에서 유리하다. 비록 용액복합화에 비하여 분산의 정도는 떨어지지만, 폴리카보네이트(PC)와 폴리에틸렌(PE)이 wrapping 된 탄소나노튜브를 복합

화한 경우에 전기적 성질에서의 임계함량이 우수하게 나타나고 열 안정성도 향상되는 결과가 보임이 보고되고 있다.

3. 탄소나노튜브 복합소재 응용 분야

3.1 Color 구현 전자파 차폐 외장재

Color 구현 전자파 차폐 외장재는 일반 비보강 플라스틱과 같은 기계적물성 및 성형성을 유지하면서 두께에 따라 투명한 색상을 나타내며 전자파 차폐 성능이 나타나는 미래형 소재이다. 이 소재의 장점은 광학적으로 투명하면서 전기전도도를 나타내는 산업 표준물질로 알려진 ITO(indium tin oxide)로는 발휘할 수 없는 힘에 대한 특성이 우수하는 것이다. 즉 외부에서 stress를 주거나 구부렸을 때 파괴되지 않으면서 전자파 차폐 특성을 보인다는 것이다. Color 구현 전자파차폐 소재가 구현되려면 극소량의 탄소나노튜브를 포함하는 복합소재가 최소한 100 S 이상의 전기전도도를 보여야 하며 전자파 차폐능은 30 dB 이상 되어야 한다. Color 구현 전자파차폐 소재가 구현되었을 때 소비자들은 일반 플라스틱과 같은 질감을 느끼면서 소비자가 원하는 색감을 만들 수 있어 전자제품용 플라스틱 소재의 시장을 재편할 수 있을 정도의 파급력이 예상된다. 이 기술은 코팅기술에 비해 구조적으로 안정하며, 다양한 구조로 성형이 가능하고, 환경친화적인 소재로서, 코팅공정이 필요 없어지는 장점이 있다.

표 2는 투명 전도성 코팅 기술에 널리 사용되는 물질로 그 특성들을 나타내었다. 탄소나노튜브가 다른 소재에 비해 우수한 특성을 보여주고 있는데 이는 다른 소재들은 약 5% 이상의 함량이 되어야 요구하는 전기전도도가 발휘되는 반면 기계적 성질이나 광학적 성질이 떨어지게 되는데 탄소나노튜브는 percolation threshold가 0.05 wt% 이내에서 광학적 성질을 그대로 유지하면서 전기전도도를 만족시킬 수 있다는 것이다. 그림 3은 EMI (1), 평판디스플레이 (2), 터치스크린 (3)의 광학 요구치 및 표면저항 값을 나타내었다. 미름모 모양이 단일벽 탄소나노튜브(SWNT)를 이용한 시제품으로 아직 요구치에는 미치지 못하는 못하지만 탄소나노튜브의 분산 기술 등 현재 풀어야 할 문제점들이 해결되면 조만간 요구치를 만족시킬 수 있을 것으로 기대된다. 그림 4는 Eikos사에서 제작한 투명 전극으로 구부렸을 때 ITO를 사용했을 때는 파괴되어 볼 수 없는 그 형태를 유지함과 동시에 전기전도성도(180 Ω/sq) 보였다.

3.2 고강도 경량 외장재

탄소나노튜브를 이용한 고강도 경량 외장재는 외장재용 플라스틱보다 약 3배 이상의 강도를 나타내며 밀도는 일반 플라스틱 수준으

표 2. 투명전도성 고분자 코팅에 사용되는 재료의 특성

	탄소나노튜브	ITO	나노금속
투명성	○	△	△
전기전도성	△	△	○
가격	△	△	×
색상	○	△	○
코팅력	○	×	×
힘강도	○	×	○
내환경성	○	○	○

○ : excellent, △ : good, × : poor

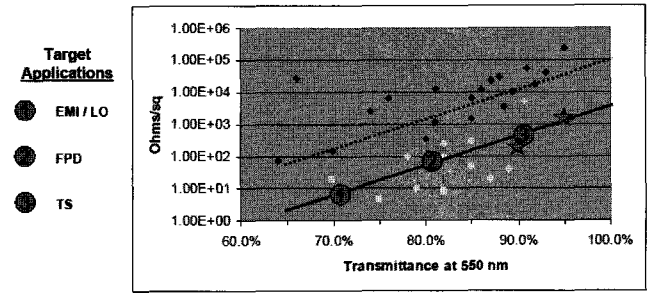


그림 3. Eikos사의 탄소나노튜브를 이용한 코팅 기술과 다른 재료와의 표면저항 비교(상단 마름모 : Eikos사).

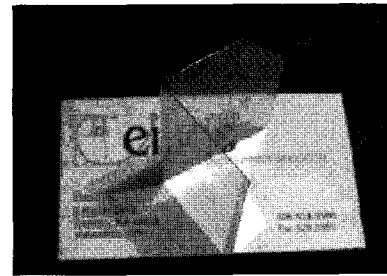


그림 4. Eikos사의 투명 전기 전도성 소재.

로 금속 및 기존의 플라스틱 외장재를 대체할 수 있는 성형성 및 높은 강도를 나타내는 소재이다. 강화 플라스틱의 경우 유동성의 저하로 0.8 mm 이하의 제품에 적용하기는 어려운 단점이 있고 두께가 얇아지면 강도가 급격히 저하되어 사용화하기 어렵다. 탄소나노튜브를 이용한 고강도 경량 소재는 높은 강도를 나타낼 것으로 기대되며 특히 가벼운 특징이 있어 휴대용 전자제품 등의 slim 화 및 경량화가 요구되는 제품의 대체가 가능하리라 생각된다.

3.3 정전분산 플라스틱

정전분산 플라스틱은 표면저항 $10^4 \sim 10^8 \Omega/sq$ 를 갖는 플라스틱을 말하는 것으로써 금속에 비해 표면저항이 높지만 일반적인 플라스틱의 표면저항($10^{12} \Omega/sq$ 이상)에 비해 현저히 낮은 표면저항을 지니는 특징이 있다. 이러한 전기적인 성질을 가짐으로써 일반적인 플라스틱의 전기절연 특성이 아닌 또 다른 영역의 특성이 나타나게 되는데 그것이 바로 정전기 분산(static dissipative)이다. 다양한 방법으로 발생된 정전기가 적절히 제어(정전분산)되지 못했을 경우에는 건물의 벼락피해, 가연재나 폭발물에 점화, 폭발 등을 일으킬 수 있으며 대전체는 사람에게 전기 쇼크를 야기하거나 먼지, 이물질 등을 흡착하게 되는데 특히 반도체 공정에서 이물질이 부품의 품질에 끼치는 영향이 막대하므로 적절한 정전기 분산이 필요하다.

범용 고분자는 절연성이기 때문에 원하는 전기전도도를 얻기 위해서는 전기전도성 충전재를 고분자와 복합화하여야 한다. 어떤 종류의 충전재로 복합화 할 것인가와 복합소재 내에서 충전재를 충분히 분산시킬 것인가가 정전분산 플라스틱의 물성에 아주 큰 영향을 미친다. 플라스틱 부품에 정전분산 기능을 부여하기 위해서 사용되는 충전재에는 metal fiber, metal flake, carbon fiber, carbon black 등이다. 이 중 metal계 충전재는 비교적 적은 함량으로 효과를 볼 수 있지만 플라스틱에 비해 현저히 높은 비중으로 인한 분산의 문제, 가공시 발생하는 마모의 문제 등으로 인해 그 활용도가 높지 않다. 또한 carbon fiber는 좋은 효과를 갖지만 fiber 특성으로 인해 플라

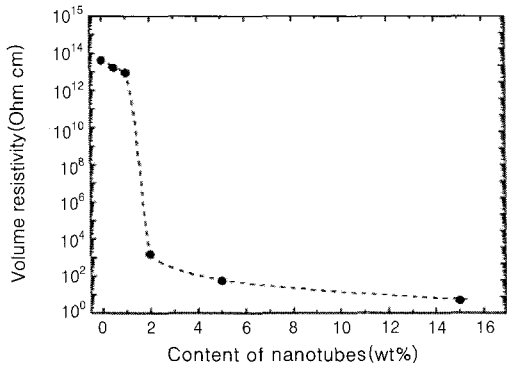


그림 5. 탄소나노튜브의 투입량에 따른 탄소나노튜브 복합소재 (PC/CNT)의 저항 값.

스틱 복합체의 경우에는 플라스틱 고유의 특성(연성)을 잃게 되어 적용의 한계를 갖고, carbon black는 비교적 많은 함량을 사용해야 필요한 효과를 갖게 되므로 이 또한 적절치 않다. 하지만 탄소나노튜브를 이용할 경우 기존의 전기전도성 충전제 보다 적은 투입량으로도 정전분산 효과를 충분히 발휘할 수 있다는 장점이 있다. **그림 5**는 탄소나노튜브 복합재료를 이용한 전지 저항을 분석한 것으로 탄소나노튜브 2 wt%의 적은 양으로 percolation threshold를 구현할 수 있다는 장점이 있다.

4. 맺음말

탄소나노튜브가 발견된지 20여년 동안 탄소나노튜브를 이용하여 고기능성 및 고성능의 복합소재를 개발하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 탄소나노튜브는 전기적으로 도체 또는 부도체성을 가지고 있을 뿐만 아니라 기계적 강도가 뛰어나고 화학적으로 안정하며 직경이 1~수십 nm로 종횡비가 기존의 어떠한 물질보다 크기 때문에 기존의 보강재료로 발휘하기 어려운 우수한 특성을 보여줄 수 있는 가능성이 매우 큰 소재이다.

현재 공급되는 탄소나노튜브의 가격은 기존 컴파운드 기기를 이용하여 연구가 가능할 정도로 저렴하지 않아 탄소나노튜브가 가지는 우수한 특성을 이용한 탄소나노튜브 복합소재의 개발에 큰 장애가 되고 있다. 하지만 비용이 저렴한 합성법 및 대량합성 기술의 개발로 공업적 수준의 탄소나노튜브의 생산이 가능해져 탄소나노튜브의 가격이 궁극적으로 탄소섬유, 더 나아가 카본블랙 수준으로 떨어질 것으로 예상되어 향후 탄소나노튜브의 산업화 진입에 가장 빠른 분야가 될 것이며 이를 이용한 고성능의 탄소나노튜브 복합소재의 산업화 진입이 빠른 시일 내에 이루어 질 것으로 기대된다.

탄소나노튜브는 고분자의 회전반경과 비슷한 크기의 직경을 가지고 있어서, 고분자와 분자 수준의 혼합체를 형성할 수 있는 가능성을 가지고 있다. 고분자와 탄소나노튜브의 분자수준 복합체가 상업화 될 경우, 투명하면서도 전기전도성을 나타내는 재료로 활용 가능

하여 새로운 디스플레이 기기의 핵심 부품 등으로 널리 활용될 전망이다. 또한 탄소나노튜브는 가운데가 비어있는 튜브 형태의 재료로서 밀도가 상대적으로 낮고 강도가 높아서, 가벼우면서도 높은 강도가 필요한 우주 항공재료 또는 mobile용 각종 기기의 재료로 활용될 수 있는 가능성이 높아서 이러한 연구도 전 세계적으로 경쟁적으로 이루어 지고 있다. 탄소나노튜브의 비중대비 강도는 현재 알려져 있는 모든 재료 중에서 가장 높은 수준으로서 이러한 특성을 활용하면 훨씬 발전된 형태의 우주케이블, 우주선, 항공기의 재료로 활용이 가능하다. 현재는 개발초기로서 매우 높은 생산 가격이 들지만, 탄소소재 중 가장 널리 사용되고 있는 카본 블랙과 비교하여 유사한 생산원가로 향후에 생산이 가능할 전망이다. 물성뿐만 아니라 경제성을 확보하고 있어서 수년 내에 재료시장을 와해할 수 있는 신소재로서의 가능성에 많은 전문가들이 관심을 가지고 있다. 이러한 신기술이 상용화 되기 위해서는 아직 해결해야 할 과제가 많이 남아있으며, 카본나노튜브의 합성기술, 표면개질 및 분리, 분산, 가공방법 등과 관련하여 화학분야에서 원천적으로 해결해야 할 일 등이 많다.

참고문헌

1. S. Iijima, *Nature*, **354**, 56 (1991).
2. C. A. Cooper, D. Ravich, D. Lips, J. Mayer, and H. D. Wagner, *Comp. Sci. Technol.*, **62**, 1105 (2002).
3. C. Bower, R. Rosen, L. Jin, J. Han, and O. Zhou, *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 3317 (1999).
4. M. J. Biercuk, M. C. Llaguno, M. Radosavljevic, J. K. Hyun, A. T. Johnson, and J. E. Fischer, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 2767 (2002).
5. H. W. Kroto, J. R. Heath, S. C. O'Brien, R. F. Curl, and R. E. Smalley, *Nature*, **318**, 162 (1985).
6. J. W. G. Wildoer and L. C. Venema, *Nature*, **391**, 59 (1998).
7. R. Saito, M. Fujita, G. Dresselhaus, and M. S. Dresselhaus, *Appl. Phys. Lett.*, 60 (1992).
8. Y. Ando, X. Zhao, T. Sugai, and M. Kumar, *Mater. Today*, **22** (2004).
9. Y. Fan, H. Cheng, Y. Wei, Y. Su, and Z. Shen, *Carbon*, **38**, 789 (2000).
10. S. Frank, *Science*, 280, 1744 (1998).
11. J. Hone, M. Whitney, and A. Zettle, *Synthetic Metals*, **103**, 2498 (1999).
12. S. Berber, Y. Kwon, and D. Tomnek, *Phys. Rev. Lett.*, **84**, (2000).
13. P. E. Schewe and B. Stein, *The American Institute of Physics Bulletin of Physics News*, **279**, (1996).
14. J. P. Salvetat-Delmotte and A. Rubio, *Carbon*, **40**, 1729 (2002).
15. www.eikos.com.